

## 磁場中有限プラズマにおける空間電荷波の研究

著者	菅井 秀郎
号	288
発行年	1970
URL	<a href="http://hdl.handle.net/10097/9024">http://hdl.handle.net/10097/9024</a>

氏 名 ( 本 籍 )	菅 井 秀 郎 ( 宮 城 県 )
学 位 の 種 類	工 学 博 士
学 位 記 番 号	工 博 第 2 8 8 号
学 位 授 与 年 月 日	昭 和 4 6 年 3 月 2 5 日
学 位 授 与 の 要 件	学 位 規 則 第 5 条 第 1 項 該 当
研 究 科 専 門 課 程	東 北 大 学 大 学 院 工 学 研 究 科 ( 博 士 課 程 ) 電 子 工 学 専 攻
学 位 論 文 題 目	磁 場 中 有 限 プ ラ ズ マ に お け る 空 間 電 荷 波 の 研 究

( 主 査 )

論 文 審 査 委 員	教 授 八 田 吉 典 教 授 上 領 香 三
	教 授 柴 田 幸 男 助 教 授 杉 田 慶 一 郎
	助 教 授 佐 藤 徳 芳

## 論 文 内 容 要 旨

### 序 論

数年前，陽光柱プラズマにおける低周波振動の研究の中で未解決で重要な問題の一つに，気圧が低い場合にコイルによって，励起される backward wave の実験があった。この現象を実験的に究明するために，直流的な流れがない高周波放電プラズマで波を励起する実験が行なわれた。その結果，直流放電の場合とは全く様子が異なり，一見不思議な性質をもつ「定在波」が観測された<sup>1)</sup>。筆者はその後実験と考察を重ねた末，「定在波」は見かけ上観測されるものであり，この波の正体は高周波放電の周波数と同じ周波数の空間電荷波であることを見いだした<sup>2,3)</sup>。そしてどのような機構でこの「定在波」が観測されるかを明らかにした。更にこの現象を一種の測定法として利用すれば，

見かけ上観測される「定在波」から空間電荷波の位相定数と減衰定数を容易に然も精度良く測定することができる。そこで、この独自の方法に基いて従来なされていなかった周波数領域で空間電荷波の実験を行なうこととなった。<sup>4)</sup>

Trivelpiece and Gould<sup>5)</sup> によって有限プラズマにおける空間電荷波の存在が指摘されて以来、これに関する多くの実験的研究がなされてきている。しかしその結果を見れば、非常に強い磁場 ( $\omega_c^2 \gg \omega_p^2$ ,  $\omega^2$ ;  $\omega_p$  = 電子プラズマ周波数,  $\omega_c$  = 電子サイクロトロン周波数) では精度の高い詳細な実験が行なわれているが、<sup>6)</sup> その逆の極限即ち非常に弱い磁場 ( $\omega_p^2 \gg \omega_c^2$ ,  $\omega^2$ ) における実験はなされていない。本論文は、従来なされていなかった非常に弱い磁場における空間電荷波の実験的研究であり、その実験結果を裏付ける理論的解析をあわせ行なったものである。

## 第1章 空間電荷波の励起と測定

### ——実験方法と結果

プラズマはいわゆる電界型の高周波放電 (10-50 MHz, 20-200 W) によって生成される。ヘルムホルツコイルにより、軸方向に均一な定常磁場 ( $B_0 = 10-60$  G) を印加する。これは非常に弱い磁場であり、 $\omega_p^2 / \omega_c^2 = 10^1 \sim 10^3$  である。放電管の周囲に巻かれたコイルに低周波 (1-100 KHz) の正磁波電流を流すことによって低周波で振幅変調された空間電荷波を励起する。この波の周波数は高周波放電の周波数と等しく、もともと存在する放電のための電界と同期しながら軸方向に伝搬していく。この波は、プラズマから放射される光を光電子増倍管に通して観測すると容易に検出することができる。即ち光量の変動分から低周波成分を取り出せば「定在波」が観測される。そこで phase-sensitive detector とモータードライブ装置を用いて自動的に波のパターンを記録させ、これから位相定数  $\beta_r$  と減衰定数  $\beta_i$  を測定する。空間電荷波の波長はプラズマ密度にほとんど無関係で、定常磁場  $B_0$ , 高周波放電の周波数  $\omega$ , プラズマ半径  $a$ , 気圧  $P$  という四個のパラメータに依存している。そこでこれらのパラメータに分散関係がどのように依存するかを見るために(1)周波数変化, (2)プラズマ半径変化, (3)気圧変化という三種類の実験を行なった。周波数変化の実験の場合の位相特性 ( $\omega / \omega_c$  vs  $a\beta_r$ ) と減衰特性 ( $\beta_i / \beta_r$  vs  $\omega / \omega_c$ ) を図1と図2にそれぞれ示す。各図において実線で示してあるのは第2章で述べる理論値である。同様にプラズマ半径変化, 気圧変化の実験結果も整理した。

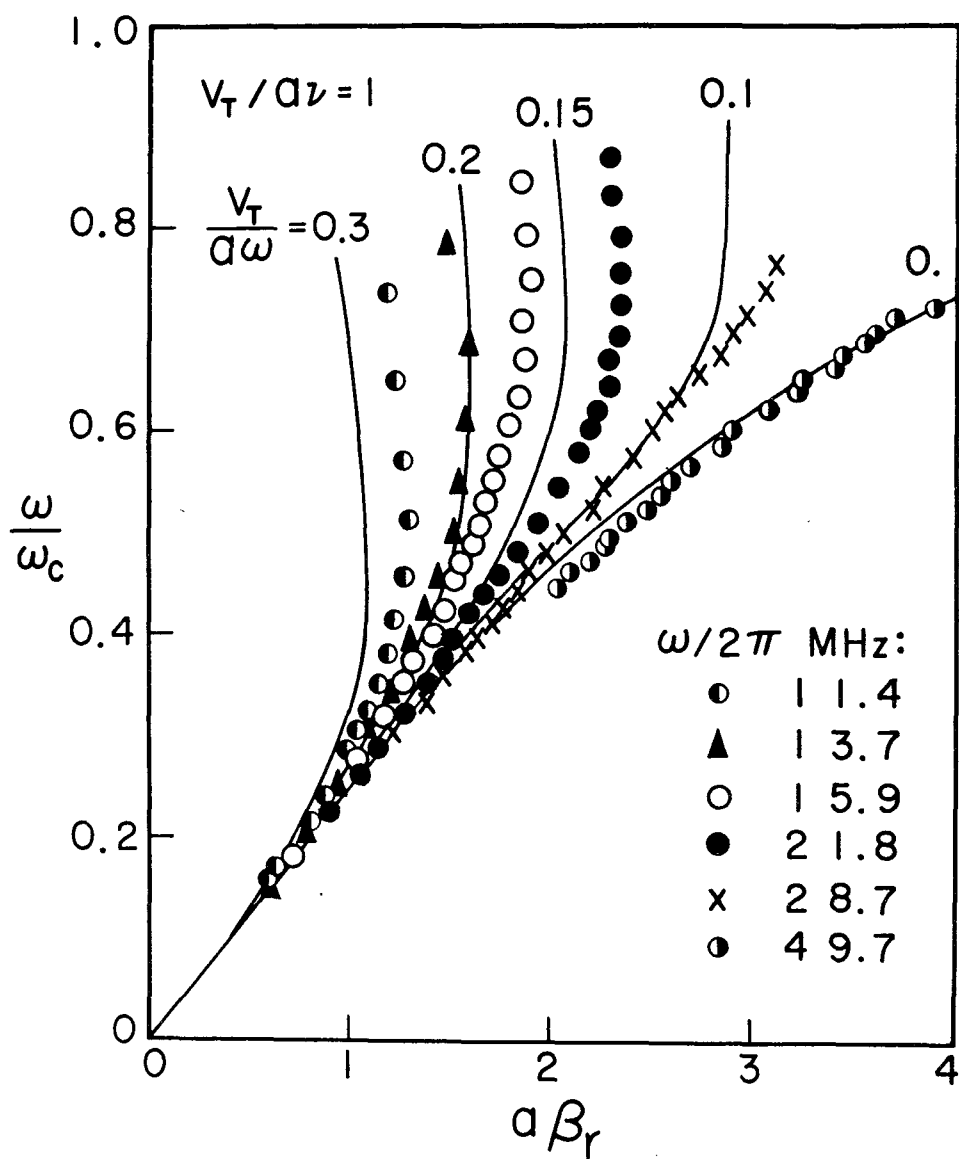


図1.  $\omega/2\pi$  をパラメータとして磁場を変えながら位相定数  $\beta_r$  を測定して得た実験値。実線は  $V_T/a\nu = 1$  において  $V_T/a\omega = 0, 0.1, 0.15, 0.2, 0.3$  に対する理論値を示す。

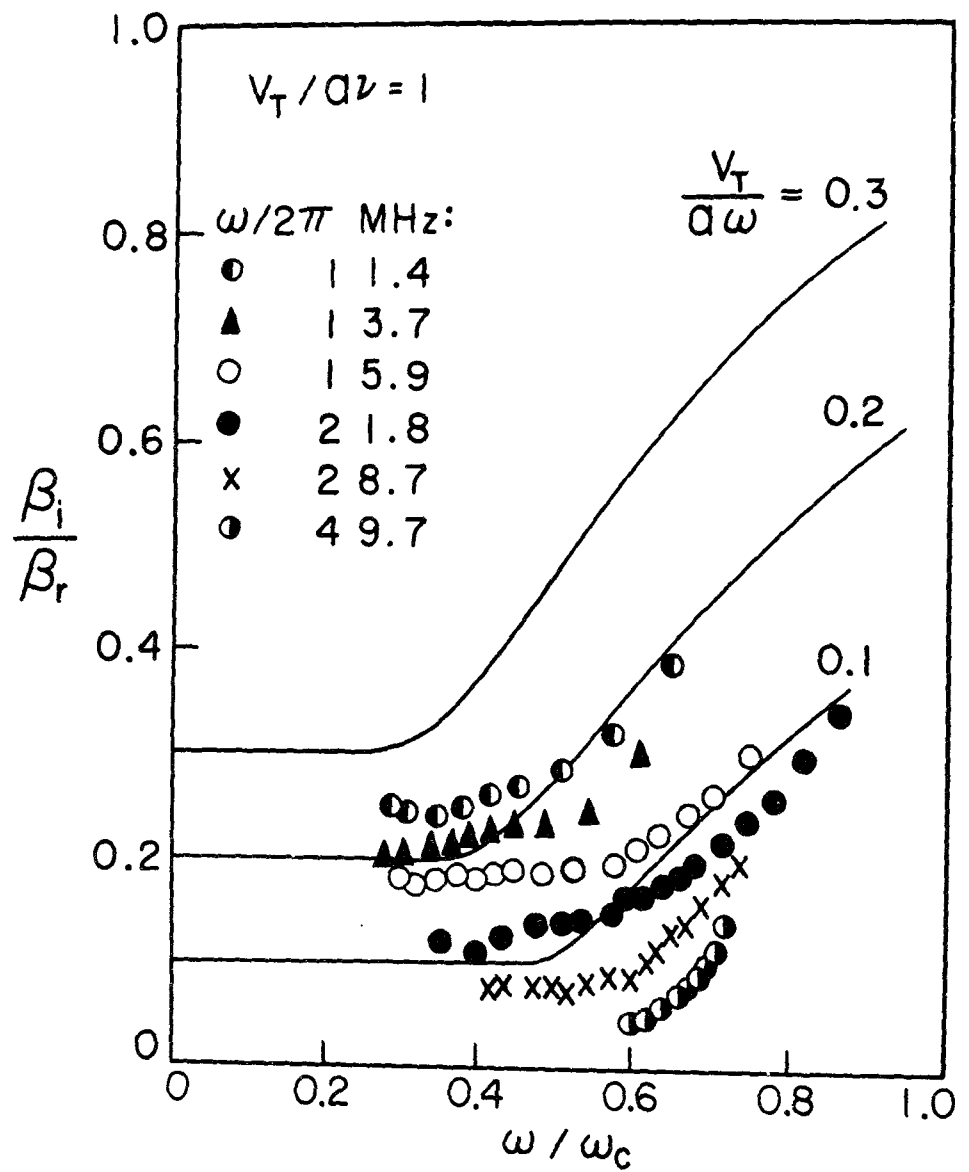


図 2.  $\omega/2\pi$  をパラメータとして磁場を変えながら減衰率  $\beta_i/\beta_r$  を測定して得た実験値。実線は  $V_T/a\nu = 1$  において  $V_T/a\omega = 0.1, 0.2, 0.3$  に対する理論値を示す。

## 第2章 空間電荷波の分散関係

### ——理論的解析

この章では第1章で述べた実験との対応を念頭において、磁場中有限プラズマにおける空間電荷波の分散特性について理論的解析を行なった。モデルとしては、磁場に沿って真空中に置かれた円柱状プラズマを考えた。一般的な分散式を導いた後に、非常に弱い磁場 ( $\omega_p^2 \gg \omega_c^2$ ,  $\omega^2$ ) の場合について詳細な検討を行なった。波の分散特性に与える影響として(1)電子の熱運動の影響、(2)電子-中性分子間の衝突の影響、(3)半径方向のプラズマの密度分布の影響、という三つのことについて重点的に調べた。熱運動と衝突の影響は Lichtenberg<sup>7)</sup> の取り扱いに衝突の効果を入れて Kinetic Theory で解析した。その結果、熱運動と衝突の影響は互に類似の傾向をもつことがわかった。即ち熱運動の場合は Landau 減衰により、衝突の場合は衝突減衰により波の減衰が生じ、どちらの場合にも位相速度が速くなることが明らかになった。更に、第1章で述べた各実験に対応させてパラメータの値を設定し、数値計算を行なった。半径方向の密度分布の影響は、簡単のため冷たいプラズマの場合に放物線状の密度分布を仮定して調べた。その結果、特に非対称モードの場合にその影響が大きく現われることが示された。

## 第3章 討 論

周波数変化の実験結果(図1)を見ると、周波数が低くなるにつれて実験値は良く知られた冷たい無衝突プラズマの理論値<sup>5)</sup>(図1における  $v_T/a\omega=0$  の曲線)からずれてくる。この「ずれ」は第2章の解析結果から熱運動の影響が又は衝突の影響と考えられる。ここに理論的には熱運動の影響は  $v_T/a\omega$ 、衝突は  $\nu/\omega$  というパラメータでその影響の大きさが決まる。周波数を変えたのではどちらのパラメータも変化するから熱運動と衝突のうちどちらがどれだけ効いているかは速断できない。しかしプラズマで半径変化の実験では  $a$  の値によって分散関係は大きく変るが、気圧変化の実験では余り変化しない。従って分散曲線の「ずれ」は主として熱運動の影響である。次に理論と実験がどの程度合っているか定量的な比較検討を行なった結果の一例を表1に示す。これは、図1において実線で示される5本の理論曲線と比較することによって、各周波数の実験値に対する  $v_T/a\omega$  の値を読み取ったものと、探針測定による電子温度と  $a$ ,  $\omega$  の値から計算した  $v_T/a\omega$  の値を示したものである。

表1. 各周波数に対する  $v_T/a\omega$  の値

$\omega/2\pi$ (MHz)	1 1.4	1 3.7	1 5.9	2 1.8	2 8.7	4 9.7
$v_T/a\omega$ (波の実験から)	0.25	0.20	0.17	0.13	0.08	0
$v_T/a\omega$ (深針から)	0.24	0.20	0.17	0.12	0.09	0.05

この表を見れば，二つの異なる方法で求められた値は良く一致していることがわかる。又，理論値が実験値に最も良く合うようにして求められた衝突周波数は，他の著者が用いている値より幾分小さい値であるがオーダーは合っている。

## 総 括

磁場中の高周波放電プラズマにコイルにより低周波の攪乱を与えると一見不思議な性質をもつ「定在波」が励起される。筆者は，この波の正体は高周波放電と同じ周波数をもつ空間電荷波であることを見いだした。そして低周波の「定在波」は，高周波放電のための電界と振幅変調された空間電荷波の電界との同期によって見かけ上観測されることを明らかにした。更にこの現象を一つの測定法として利用して，従来なされていなかった非常に弱い磁場 ( $\omega_p^2 \gg \omega_c^2$ ,  $\omega^2$ ) における空間電荷波の実験を詳細に行なった。その実験結果は良く知られている冷たい無衝突プラズマの理論<sup>5)</sup>からは説明できない。そこでLichtenbergによるKinetic Theory<sup>6)</sup>を衝突がある場合にまで拡張して，熱運動と衝突を同時に考慮した空間電荷波の分散式を求め数値計算した。この理論と実験は良く一致し，非常に弱い磁場における空間電荷波は熱運動の影響をかなり大きく受けることが初めて実証された。又，減衰定数の測定結果から電子-中性分子間衝突の影響も無視できないことがわかった。更に半径方向の密度分布の影響は非対称モードの場合に大きく現われることが理論的及び実験的に示された。

本論文の提出に当り，御指導戴いた八田吉典教授に心から感謝致します。又，本研究を直接指導して下さい，終始御教示と励ましを戴いた佐藤徳芳助教授には衷心より感謝の意を表してやみません。

## 参 考 文 献

- 1) N.Sato and Y.Hatta, Phys.Rev.Letters 16, 306 (1966); N.sato, H.Sugai, and Y.Hatta, ibid 17, 167 (1966)
- 2) 菅井, 佐藤, 八田, 「核融合研究」Vol. 21, 223 (1968)
- 3) H.Sugai, N.Sato, and Y.Hatta, J.Phys.Soc.Japan 27, 746 (1969)
- 4) H.Sugai, N.Sato, and Y.Hatta, J.Appl.Phys. 42, 2421 (1971)
- 5) A.W.Trivelpiece and R.W.Gould, J.Appl.phys. 30, 1784 (1959)
- 6) J.H.Malmberg and G.B.Wharton, phys.Rer.Letters 13, 184 (1964), ibid 17, 175 (1966).
- 7) A.J.Lichtenberg, IEEE Trans.Elec.Devices ED-11, 62 (1964), A. J.Lichtenberg and J.S.Jason, J.Appl.phys. 36, 449 (1965).

## 審 査 結 果 の 要 旨

プラズマ中の波動現象はプラズマ電子工学の立場から、又は核融合制御の基礎物理としての観点から、多くの研究者によって研究されているが、著者はそれらの研究の体系化に貢献することを目的として管軸方向に静磁界を加えた円筒状プラズマ中の空間電荷波について詳細な研究を行ない、特に独創性の高い測定法を提案し、精度の高い実験を行なって多くの知見を得た。本研究はそれらの研究をまとめたもので序論および3章より成る。

序論においては管軸方向に静磁界を加えた円筒状プラズマ中における空間電荷波の理論的ならびに実験的研究についての歴史的展望を行ない、本研究の背景と特徴を明らかにしている。

第1章では著者の提案した空間電荷波分散特性測定法の原理ならびに装置の構成についてのべ、ついでそれを用いて得られた実験結果について説明している。この測定法の提案は極めて独創性の高いもので、本論文の中心をなすものである。

測定法の原理を次に示す。プラズマ容器を形成するガラス管の両端に高周波電界  $E_0 \cos 2\pi f_0 t$  を加え、高周波放電をおこさせて弱電離プラズマを発生させる。ついでガラス管に局所的にまかれたコイルに、 $f_0$  より充分低い周波数  $f_1$  の低周波電流を流すと、周波数  $f_1$  で振巾変調された周波数  $f_0$  の空間電荷波が励起され、これが高周波電界  $E_0$  中を伝搬するため、 $f_1$  によって振巾変調された定在波となって観測される。従ってこの定在波の波長ならびに振巾の変化を周波数  $f_1$  の観測系を通して測定することにより、周波数  $f_0$  の空間電荷波の伝搬特性を測定することができる。すなわちこの測定法は定在波を発生させると共に、必要な情報を低周波  $f_1$  の現象に変換して測定技術の簡易化と同時に測定精度の向上を可能ならしめたものである。著者はこの測定法を用いて従来実験データが空白となっていた弱磁場の領域について多くの実験を行ない、対称モードの場合と非対称モードの場合との比較、ランダウ減衰と衝突減衰などについて詳細な測定を行なった。

第2章では前章の実験結果を検討するための理論的解析を行なっている。空間電荷波の理論については、すでに各種の条件のもとで、いくつかの研究が行なわれているが、著者はまずできるだけ一般化された理論をたて、ついで前章の実験条件を考慮しつつ、実験結果の検討に必要な数値計算を電子計算機を用いて行なっている。

第3章ではこれまでに行なった実験的研究と理論的考察を比較して討論を行なっているが両者間の一致はこの種の実験としては極めてよいといえることができる。これは著者の提案した測定法の有効性を実証するものである。

これを要するに本論文は磁場中有限プラズマにおける空間電荷波の分散特性を測定する巧妙な測定法を提案し、これを用いて精度の高い一連の実験を行なって多くの知見を得たものであって、プラズマ物理工学上、ならびに基礎電子工学上寄与するところが少なくない。

よって、本論文は工学博士の学位論文として合格と認める。